

**Авторы:**

д.т.н. Кужеков С.Л.,
к.т.н. Дегтярев А.А.,
ООО НПФ «Квазар»,
г. Новочеркасск, Россия.

к.т.н. Дони Н.А.,
к.т.н. Шурупов А.А.,
Петров А.А.,
Костарев Л.Н.,
Кошельков И.А.,
ООО НПФ «ЭКРА»,
г. Чебоксары, Россия.

D.Sc. Kuzhekov S.L.,
Ph.D. Degtyarev A.A.,
NPF Kvarzar,
Novocherkassk, Russia.

Ph.D. Doni N.A.,
Ph.D. Shurupov A.A.,
Petrov A.A.,
Kostarev L.N.,
Koshelkov I.A.,
EKRA Ltd.,
Cheboksary, Russia.

АНАЛИЗ НЕСЕЛЕКТИВНЫХ ДЕЙСТВИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ СБОРНЫХ ШИН ПРИ ВНЕШНИХ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ С НАСЫЩЕНИЕМ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА В НЕПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЕ

ANALYSIS OF NON-SELECTIVE ACTIONS OF BUSBAR DIFFERENTIAL PROTECTION AT EXTERNAL SINGLE-PHASE SHORT CIRCUITS WITH SATURATION OF CURRENT TRANSFORMER IN A HEALTHY PHASE

Аннотация: выполнен анализ неселективных действий в переходных режимах однофазных коротких замыканий вне зоны действия дифференциальных защит сборных шин напряжением 110 кВ подстанций распределительных электрических сетей. Указанные действия обусловлены насыщением магнитопроводов трансформаторов тока (ТТ) класса Р, установленных в неповреждённых фазах. Обоснован способ повышения селективности указанных защит в рассмотренных режимах. Предложены методики расчёта времени до насыщения ТТ в неповреждённой фазе и вторичного тока в переходном режиме КЗ, основанные на использовании универсальных характеристик ТТ с прямоугольной характеристикой намагничивания (ПХН) для переходного режима КЗ.

Ключевые слова: короткое замыкание, дифференциальная защита шин, трансформатор тока, переходный процесс, время до насыщения, неповреждённая фаза.

Актуальность темы

Одними из основных источников информации для устройств релейной защиты и автоматики в электроэнергетической системе России являются электромагнитные ТТ класса Р, магнитопроводы которых не имеют немагнитного зазора. С появлением быстродействующих защит участились случаи неселективных действий основных защит линий и быстродействующих ступеней резервных защит при коротких замыканиях (КЗ) на сборных шинах или вблизи сборных шин распределительных устройств крупных электростанций и подстанций сверхвысокого напряжения 330-750 кВ (СВН) по причине насыщения магнитопроводов ТТ. Указанные действия опасны по последствиям, так как они снижают запас динамической устойчивости электроэнергетической системы (ЭЭС) и уровень надёжности электроснабжения потребителей.

По этой причине зарубежные стандарты уделяют внимание условиям работы ТТ в переходных режимах [1-3].

Неселективные действия дифференциальных защит шин (ДЗШ) отмечены также в распределительных электрических сетях напряжением 110 кВ в переходных режимах однофазных КЗ вне зоны действия защиты. Особенность указанных случаев заключается в том, что ток, вызывающий срабатывание ДЗШ, протекал по вторичной обмотке неповреждённой фазы (по первичной обмотке которой не протекал ток КЗ). Ток во вторичной обмотке ТТ, включённого в повреждённую фазу, перераспределяется между нулевым проводником и ветвью вторичного тока ТТ, включённого в неповреждённую фазу. В отечественной литературе ток в неповреждённой фазе при однофазных КЗ получил название «ток отсosa» [4, 5].

Abstract: the article analyses non-selective actions in transient modes of single-phase short circuits out of operating zone of 110 kV busbar differential protection at distribution networks substations. The non-selective actions are caused by saturation of magnetic conductors of the current transformers (CT), P class, installed in the healthy phases. The article founds a method of selectivity improving of the specified protections in the analyzed modes. The calculation method of the time before CT saturation in the healthy phase and secondary current in SC transient mode based on CT universal characteristics with the rectangular saturation curve for SC transient mode are offered.

Keywords: short circuit, busbar differential protection, current transformer, transient process, time before saturation, healthy phase.



Кужиков

Станислав Лукьянович

В 1964 г. окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института (НПИ). В 1988 г. в Институте электродинамики АН УССР (г. Киев) защитил докторскую диссертацию. В настоящее время — главный инженер ООО НПФ «Квазар».

В зависимости от значения следует различать два уровня «тока отсоса»:

1. «Ток отсоса» первого уровня существует в установившемся режиме (при синусоидальном первичном токе КЗ), если падение напряжения на нулевом проводнике (практически равное напряжению на вторичной обмотке ТТ неповрежденных фаз) не достигло точки перегиба вольт-амперной характеристики (ВАХ). Этот ток во многих случаях не превышает 2% вторичного тока КЗ, и поэтому не вызывает неправильного срабатывания ДЗШ.

2. «Ток отсоса» второго уровня, обусловленный насыщением магнитопровода неповрежденной фазы.

В установившемся режиме при синусоидальном напряжении на нулевом проводнике насыщение магнитопровода ТТ неповрежденной фазы наступает, если это напряжение превышает напряжение точки перегиба ВАХ. В переходном режиме, когда по нулевому проводнику кроме синусоидальной (периодической) составляющей протекает аperiodическая (свободная затухающая) составляющая, а в магнитопроводе имеется остаточная магнитная индукция неблагоприятного знака, ТТ насыщается при значительно меньшем значении указанной периодической составляющей. При этом сопротивление ТТ неповрежденной фазы резко падает, и по его вторичной обмотке проходит часть тока нулевого проводника группы ТТ, соединённой в звезду. В результате «ток отсоса» может привести к неправильной работе защиты. В описанном в данной статье случае на ПП «Угутский» по вторичной обмотке ТТ неповрежденной фазы протекал ток, равный 36% вторичного тока КЗ.

Цель статьи заключается в определении причины неправильных действий защит шин в неповрежденных фазах в переходных процессах однофазных КЗ вне защищаемой зоны и разработке практических рекомендаций по обеспечению их правильного функционирования в указанных режимах.

Анализ случая неправильного действия ДЗШ

На ПП 110 кВ «Угутский» 02.08.2018 в 05:24 при однофазном КЗ на ВЛ 110 кВ «Пыть-Ях» произо-

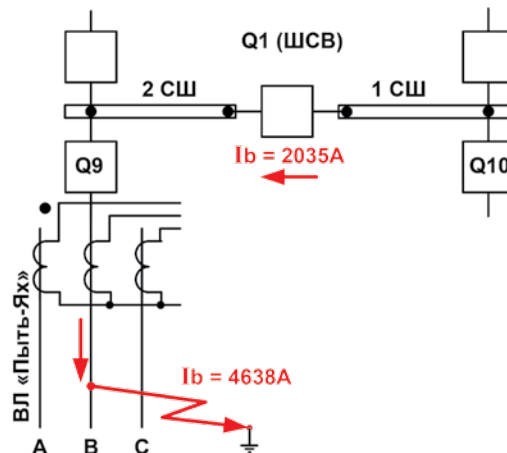


Рис. 1. Токораспределение на ПП «Угутский» при однофазном КЗ на ВЛ «Пыть-Ях»

шло срабатывание дифференциальной защиты шин (ДЗШ) с действием на отключение 1СШ и 2СШ. Причина КЗ – разрушение конденсатора связи на ВЛ 110 кВ «Пыть-Ях». Место повреждения не входило в зону действия ДЗШ. Нелегитимное срабатывание ДЗШ произошло при ручном включении выключателя ВЛ.

Хронология происшествия на ПП 110 кВ «Угутский»:

- 02.08.2018 г. в 05-13-17 аварийное отключение ВЛ 110 кВ «Пыть-Ях» – «Угутский».
- 02.08.2018 г. в 05-13-19 неуспешное АПВ ВЛ 110 кВ «Пыть-Ях» – «Угутский».
- 02.08.2018 г. в 05-25-00 при ручном включении ВЛ 110 кВ «Пыть-Ях» отключились 1СШ-110 и 2СШ-110 действием ДЗШ-110.



Рис. 2. Осциллограмма терминала АУВ ВЛ «Пыть-Ях» при КЗ в фазе В



Дегтярев Андрей Александрович

В 2007 г. окончил Южно-Российский государственный технический университет (НПИ), кафедра «Автоматика и телемеханика». В 2011 г. в ЮРГТУ (НПИ, г. Новочеркасск) защитил кандидатскую диссертацию. В настоящее время – ведущий инженер ООО НПФ «Квазар».



Дони Николай Анатольевич

В 1969 г. окончил энергетический факультет НПИ. В 1981 г. во ВНИИЭ защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование и разработка высокочастотной защиты линий сверхвысокого напряжения». Имеет более 140 научных публикаций в области релейной защиты, микропроцессорной техники и цифровой обработки сигналов электроэнергетических систем. Директор по науке – заведующий отделом систем РЗА ООО НПФ «ЭКРА».

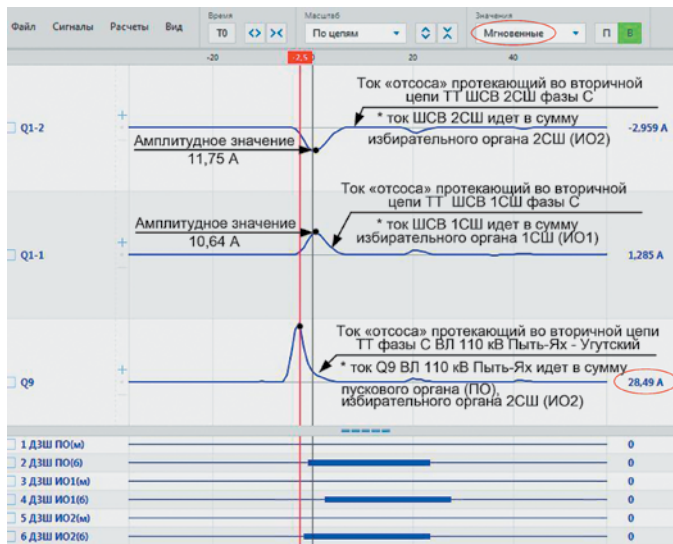


Рис. 3. Осциллограмма терминала ДЗШ фазы С, на которой показаны токи в цепи ШСВ и ВЛ «Пыть-Ях» при 1-фазном КЗ по фазе В на ВЛ «Пыть-Ях»

Неселективному срабатыванию ДЗШ в 05-25-00 предшествовало двукратное отключение тока КЗ на ВЛ «Пыть-Ях», которое могло привести к появлению остаточной магнитной индукции в магнитопроводах ТТ ВЛ «Пыть-Ях» и ТТ ШСВ.

Схема распределительного устройства – двойная система шин с обходной, показана на рис. 1.

На рис. 2 приведена осциллограмма напряжений и вторичных токов ТТ в цепи АУВ ВЛ «Пыть-Ях» при однофазном КЗ в фазе В. На осциллограмме, в момент протекания тока КЗ по фазе В, в фазе С возник импульс тока длительностью 9 мс, имеющий противоположную (по отношению к току в фазе В) полярность.

Данный импульс обусловлен перераспределением вторичного тока ТТ фазы В между нулевым проводом ТТ фаз А, В, С, соединенных в звезду, и ветвью С, и имеет полярность, соответствующую току в нулевом проводнике.

На рис. 3 приведена осциллограмма терминала ДЗШ фазы С, на которой показаны токи в неповрежденной фазе С в цепи шиносоединительного выключателя (ШСВ) и ВЛ «Пыть-Ях» (из рис. 2) при однофазном КЗ в фазе В. Вторичные токи ТТ в цепи ШСВ обозначены как Q1-1 (для 1СШ) и Q1-2 (для 2СШ) соответственно. Вторичный ток ТТ в цепи (Q9) ВЛ «Пыть-Ях» обозначен Q9.

Неселективное действие ДЗШ на отключение 2СШ произошло из-за протекания тока (с максимальным значением до 28,52 А, рис. 2)

по вторичным цепям фазы С присоединения (Q9) ВЛ «Пыть-Ях». Этот ток (называемый в отечественной литературе «током отсоса») является частью вторичного тока КЗ ВЛ «Пыть-Ях», основная часть которого протекает по нулевому проводнику. Так как при насыщении магнитопровода в неповрежденной фазе электрическое сопротивление ТТ существенно уменьшается, то создаются условия для разделения вторичного тока ТТ поврежденной фазы на два пути (нулевой проводник и вторичная обмотка ТТ неповрежденной фазы) с примерно одинаковыми сопротивлениями.

Неселективное действие ДЗШ на отключение 1СШ объясняется протеканием тока (с амплитудным значением до 11 А в ТТ Q1-1) по вторичным цепям фазы С ШСВ. Причина протекания тока по фазе С ШСВ аналогична описанной для фазы С (Q9) ВЛ «Пыть-Ях», а более позднее появление импульса «тока отсоса» (позже на 5 мс) объясняется меньшим током, протекавшим по ШСВ по сравнению с ВЛ «Пыть-Ях», и соответственно, более поздним насыщением магнитопровода ТТ Q1-1 фазы С ШСВ.

В качестве примера ниже приведен расчёт тока ТТ в неповрежденной фазе, встроенного в элегазовый выключатель ВЭБ-110 кВ ВЛ «Пыть-Ях», выполненный с использованием ВАХ.

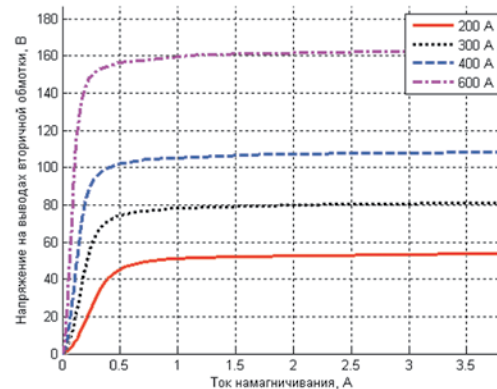


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики ТТ, встроенных в элегазовый выключатель ВЭБ – 110



Шурупов

Алексей Александрович

В 1973 г. окончил НПИ, кандидат технических наук (НПИ, 1981 год), старший научный сотрудник. Заведующий отделом разработки подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».



Петров

Андрей Анатольевич

В 2004 г. окончил кафедру электрических и электронных аппаратов электротехнического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Присвоена степень магистра техники и технологии по направлению «Электротехника, электромеханика и электро-технологии». Заместитель заведующего отделом разработки подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».

На рис. 4 приведена ВАХ ТТ, имеющего коэффициент трансформации 600/5 А, класса 10Р, с номинальной предельной кратностью тока, равной 14.

До точки перегиба ВАХ с координатами (примерно) 150 В и 0,25 А сопротивление намагничивающей ветви ТТ практически постоянно и равно:

$$z_0 = \frac{U_2}{I_0} = \frac{150}{0,25} = 600 \text{ Ом.}$$

Сопротивление нулевого проводника длиной 150 м, сечением 2,5 мм² равно 1,05 Ом. Максимальное мгновенное значение вторичного тока ТТ в повреждённой фазе В по осциллограмме (рис. 2) равно 75,98 А. Падение напряжения на нулевом проводнике равно:

$$u_{\text{нп}} = i \cdot R_{\text{нп}} = 75,98 \cdot 1,05 = 79,78 \text{ В.}$$

Максимальное значение «тока отсоса» первого уровня составляет:

$$I_{\text{отс. макс}} = \frac{u_{\text{н.п.}}}{z_0} = \frac{79,78}{600} \approx 0,13 \text{ А.}$$

Очевидно, что такое значение «тока отсоса» недостаточно для неправильного срабатывания ДЗШ неповрежденной фазы и, в данном случае, должна идти речь о «токе отсоса» второго уровня.

Фактическое значение «тока отсоса» по осциллограмме в этот момент равно (-28,52) А, т.е. магнитопровод ТТ насыщен и по его вторичной обмотке протекает «ток отсоса», относящийся ко второму уровню.

Постановка задачи

Возможны следующие варианты предотвращения случаев неселективного срабатывания ДЗШ при внешнем однофазном КЗ из-за протекания «тока отсоса» по вторичным обмоткам ТТ неповрежденной фазы:

1. Использование новых преобразователей тока, не имеющих повышенных погрешностей в переходных режимах.
2. Усовершенствование микропроцессорных устройств релейной защиты сборных шин с целью обеспечения их правильной работы в переходных режимах с насыщением магнитопроводов существующих ТТ.

Очевидно, что первый вариант целесообразен для реконструируемых энергообъектов, для которых планируется замена ТТ.

Использование второго варианта удобно в действующих электроустановках, так как при этом не требуются демонтаж и замена ТТ. Однако известные способы обеспечения правильной работы дифференциальных защит шин [6, 7] в условиях насыщения ТТ в неповрежденной фазе, как правило, не эффективны. По этой причине целесообразно разработать новые технические решения, а также методику проверки и выбора ТТ, учитывающие наличие в первичном токе аperiodической составляющей и остаточной магнитной индукции в магнитопроводе ТТ.

В рамках данной статьи проведен анализ возможности адаптации устройств дифференциальной защиты шин к работе при повышенных погрешностях существующих ТТ в переходных режимах.

Теоретическая часть

В большинстве литературных источников, кроме [10, 11], не уделяется внимание анализу процессов во вторичных цепях ТТ, соединённых в группы, в том числе в используемой в защитах шин схеме соединения вторичных обмоток ТТ в звезду с нулевым проводником.

На рис. 5 приведены полученные с помощью ЭВМ [12] временные диаграммы первичных, вторичных токов и магнитных индукций в магнитопроводах ТТ, включённых по схеме звезда с нулевым проводником.

Приняты следующие обозначения:

i_A, i_B, i_C – токи в фазах А, В, С (сплошные линии) – вторичные, пунктирные – первичные, приведённые ко вторичным цепям ТТ);

$i_{\text{н.п}}$ – ток в нулевом проводнике схемы соединения ТТ в звезду;

B_a, B_b, B_c – магнитные индукции в магнитопроводах ТТ фаз А, В, С.

Рассмотрен случай однофазного КЗ в фазе А, при котором в токе содержится максимальная аperiodическая составляющая. В фазах В и С протекают токи нагрузки. В магнитопроводе ТТ фазы В имеется начальная магнитная индукция, равная (-1,2) Тл. Видно, что ТТ неповрежденной фазы В насыщается примерно через 0,05 с после начала КЗ и в его вторичной ветви появляется ток, значительно превышающий ток нагрузочного режима. Магнитопровод ТТ поврежденной фазы А насыщается немного позже, спустя примерно 0,07 с после начала КЗ. После насыщения ТТ в поврежденной фазе А вторичный ток ТТ в фазе В существенным образом уменьшает-



Кошельков Иван Александрович

В 2010 г. окончил кафедру электрических и электронных аппаратов электротехнического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2010 году. Присвоена степень магистра техники и технологии по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Заведующий сектором ЦПС отдела разработки подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».



Костарев Лев Николаевич

В 1996 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности «Электрические и электронные аппараты». Ведущий инженер отдела разработки подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».

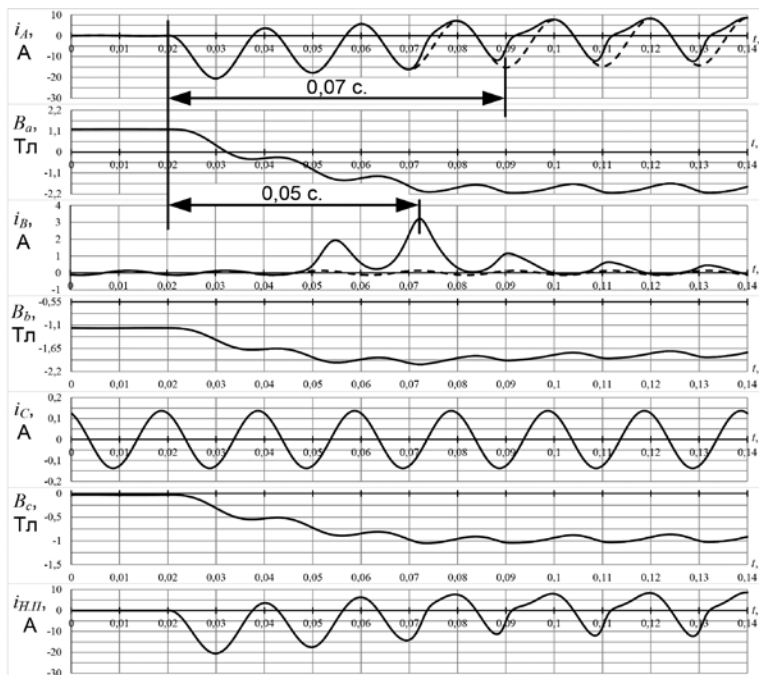


Рис. 5. Временные диаграммы первичных и вторичных токов и магнитных индукций в сердечниках ТТ, включенных по схеме звезда с нулевым проводом

ся. Ток в нулевом проводнике звезды $i_{н.п}$ существенно искажается после насыщения сердечника ТТ фазы А.

Появление тока во вторичной ветви ТТ фазы В, не обтекаемого током КЗ, объясняется перераспределением вторичного тока ТТ фазы А между нулевым проводником ТТ, соединённых в звезду, и насыщенным ТТ фазы В. Следует подчеркнуть, что ток во вторичной цепи этого ТТ становится значительным только при насыщенном магнитопроводе.

Методика расчёта времени до насыщения ТТ при однофазном КЗ

На рис. 6, а изображено распределительное устройство с одинарной системой шин. На присоединении N, коммутируемом выключателем QN, существует однофазное КЗ $K^{(1)}$ вне зоны действия защиты шин. ТТ в цепях всех присоединений включены по схемам звезды с общим нулевым проводником. Трансформаторы тока TAN включены в цепь присоединения, по которому проходит сквозной ток $i_{скв}$ внешнего однофазного фазного КЗ $K^{(1)}$. С целью упрощения принято, что ТТ в цепях присоединений, не обтекаемых суммарным током КЗ, не насыщаются.

Качественный анализ процессов в схеме защиты шин удобно производить при аппрок-

симации характеристик намагничивания ТТ TAN в цепи повреждённого присоединения прямоугольной характеристики (ПХН).

До насыщения магнитопроводов ТТ идеально трансформируют ток, а после насыщения трансформация прекращается, что имитируется замыканием одного из ключей S_a-S_c на рис. 6, б. Принято также, что сопротивления во вторичных токовых цепях всех ТТ имеют активный характер. Указанные допущения приемлемы для современных ТТ и вторичных цепей микропроцессорных защит шин, и по этой причине широко используются в

технической литературе.

На рис. 6, б приняты следующие обозначения:

- $i'_{скв.А}, i'_{скв.В}, i'_{скв.С}$ – приведённые ко вторичной стороне первичные токи ТТ, обтекаемых сквозным током КЗ;
- S_a, S_b, S_c – ключи, имитирующие насыщение магнитопроводов ТТ;
- i_{2a}, i_{2b}, i_{2c} – вторичные токи ТТ;
- R_{2a}, R_{2b}, R_{2c} – активные сопротивления вторичных обмоток ТТ;
- $R_{пр.а}, R_{пр.б}, R_{пр.с}$ – активные сопротивления соединительных проводов во вторичных цепях ТТ;
- $R_{р.а}, R_{р.б}, R_{р.с}$ – активные сопротивления устройств РЗА, подключенных через промежуточные трансформаторы тока TL_a, TL_b, TL_c ;
- $R_{н.п}$ – активное сопротивление нулевого проводника во вторичных цепях ТТ.

Пусть в магнитопроводе одного из ТТ, по которому не проходит ток однофазного КЗ, например, фазы В, имеется значительная остаточная магнитная индукция. При этом последняя совпадает по знаку с направлением перемагничивания, обусловленным напряжением на $R_{н.п}$. В этих условиях возможно насыщение магнитопровода ТТ, имитируемое замыканием ключа S_b .

Минимальное время до насыщения (первый момент насыщения) ТТ с ПХН в непо-

вреждённой фазе в переходном режиме однофазного КЗ вычисляется по приложенному к вторичной обмотке ТТ падению напряжения U_{2sin} на нулевом проводнике схемы соединения ТТ в звезду, обусловленному протеканием по нему синусоидального тока заданной кратности. При этом учитывается наличие в токе, протекающем по нулевому проводнику, максимальной аperiodической составляющей с заданной постоянной времени затухания и максимальной остаточной магнитной индукции неблагоприятного знака в магнитопроводе этого ТТ.

Известно, что потокосцепление вторичной обмотки ТТ может быть вычислено путём интегрирования прило-

женного к ней напряжения, а время до насыщения – как момент равенства вычисленного потокосцепления потоко- сцеплению насыщения $\Psi_{нас}$. Указанное время удобно определить путём решения трансцендентного уравнения переходного процесса в ТТ [13]:

$$A(1 - K_r) = K_{п.р}(t), \quad (1)$$

где $K_{п.р}(t) = \frac{\Psi_{п.р}}{\Psi_m}$ – коэффициент переходного режима; $K_r = \frac{B_r}{B_{нас}}$ – коэффициент остаточной магнитной индукции, т.е. отношение остаточной магнитной индукции B_r к магнитной индукции насыщения $B_{нас}$.

A – параметр режима работы ТТ, определяемый по выражению

$$A = \frac{U_{нас}}{U_{2sin}}, \quad (2)$$

$U_{нас}$ – напряжение насыщения, определяемое по ВАХ ТТ при токе

$$I_{0.10} = 0,10 \cdot I_{2.ном} \cdot K_{факт}; \quad (3)$$

$$I_{0.05} = 0,05 \cdot I_{2.ном} \cdot K_{факт}.$$

Коэффициенты 0,05 и 0,10 соответствуют 5%-ной или 10%-ной полной погрешности ТТ.

Фактическая кратность тока КЗ вычисляется по выражению:

$$K_{факт} = \frac{I_{кз}}{I_{1.ном}}, \quad (4)$$

где $I_{кз}$ – действующее значение периодической составляющей тока КЗ;

$I_{1.ном}$ – номинальный первичный ток ТТ.

Синусоидальное напряжение U_{2sin} при активном характере сопротивления нулевого проводника определяется по выражению:

$$U_{2sin} = K_{факт} \cdot I_{2.ном} \cdot R_{н.л}, \quad (5)$$

где $R_{н.л}$ – сопротивление нулевого проводника.

Коэффициент переходного режима $K_{п.р}(t) = \frac{\Psi_{п.р}}{\Psi_m}$ – показывает, во сколько раз потокосцепление вторичной обмотки ТТ в переходном режиме $\Psi_{п.р}$ возрастает за счёт влияния аperiodических составляющих в напряжении

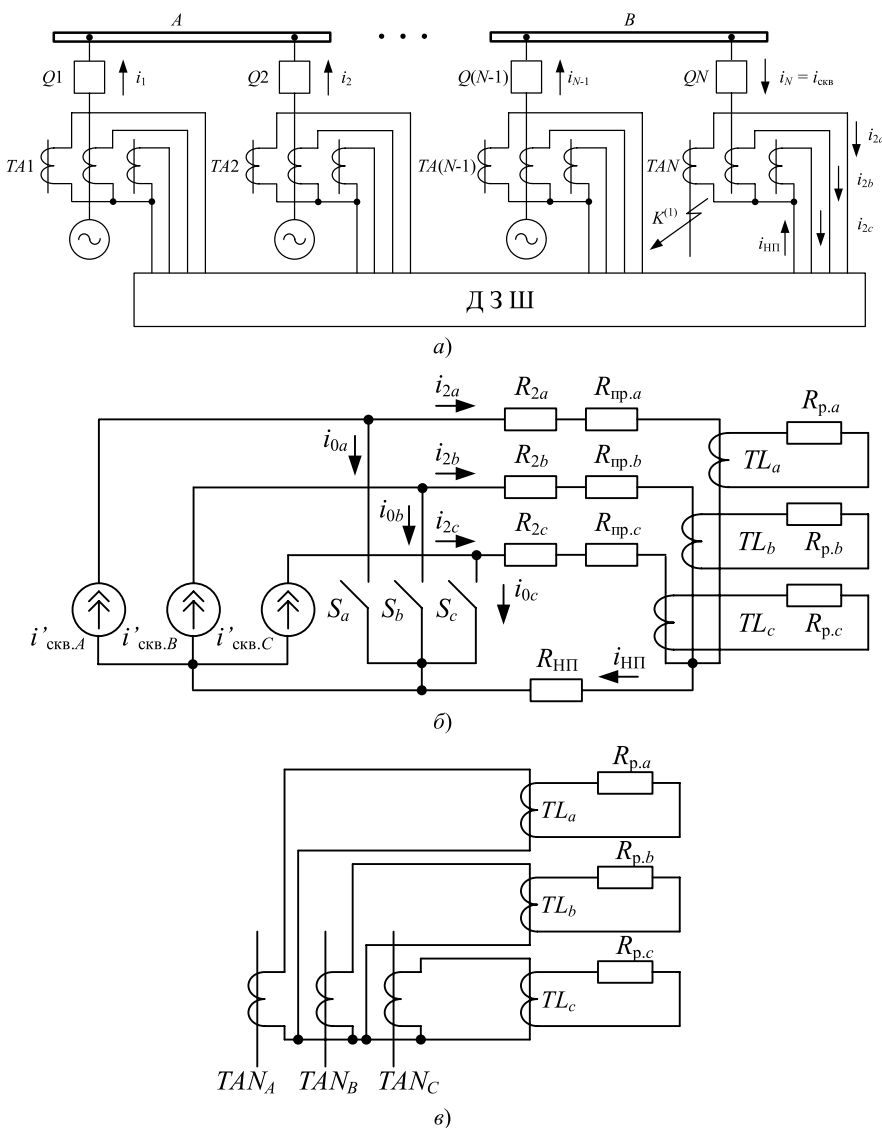


Рис. 6. Распределительное устройство с одинарной системой шин (а), эквивалентная схема трехфазной группы ТТ TAN, соединенной по схеме звезды с нулевым проводником (б), подключение ТТ к входам защиты индивидуальными нулевыми проводниками (в)



на нулевом проводнике по сравнению с потокосцеплением Ψ_m в установившемся режиме при протекании по этому проводнику синусоидального тока с заданной кратностью. В частном случае наличия только одной апериодической составляющей с максимальным относительным содержанием и постоянной времени T_p этот коэффициент вычисляется по выражению [12]:

$$K_{н.р}(t) = \omega \cdot T_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}} \right) - \sin(\omega t), \quad (6)$$

До решения уравнения (1) необходимо определить сопротивление $R_{н.п}$ нулевого проводника в схеме звезды, параметры тока КЗ (фактическую кратность первичного тока $K_{факт}$), начальные значения и постоянные времени затухания апериодической(их) составляющей(их). Необходимо также иметь ВАХ ТТ. Последняя должна представлять собой зависимость действующего (эффективного) значения синусоидального напряжения на вторичной обмотке ТТ от действующего (эффективного) значения намагничивающего тока ТТ. Решение уравнения (1) удобно производить графически с использованием рис. 2, приведённого в [13].

Если остальные ТТ дифференциальной защиты не насыщаются, то ток небаланса в неповреждённой фазе В, существующий в интервале насыщенного состояния магнитопровода ТТ этой фазы, равен разности токов:

$$i_{нб.в} = i'_{1в} - i_{2в}, \quad (7)$$

Так как ток КЗ значительно превышает токи нагрузки в неповреждённой фазе В, то пренебрегая последним (полагая, что $i'_{1в} = 0$), можно записать:

$$i_{нб.в} \approx -i_{2в}. \quad (8)$$

Фактически ток небаланса определяется частью сквозного тока фазы А $i'_{1А}$ (приведённого ко вторичной стороне ТТ):

$$i_{2в} = -i'_{1А} \frac{R_{н.п}}{R_{2в} + R_{пр.в} + R_{р.в} + R_{н.п}} \quad (9)$$

и воспринимается защитой как признак КЗ в зоне её действия.

В рассматриваемом случае однофазного КЗ также имело место насыщение магнитопроводов ТТ, включённых в неповреждённую фазу в цепи ШСВ. Расчёт времени до насыщения указанных ТТ также производится по выражениям (1-6).

Приближённый расчёт с помощью моделей ТТ для ручных расчётов показал, что по отношению к приведён-

ному ко вторичной стороне ТТ току КЗ с погрешностью, не превышающей 10%, ток небаланса составляет (30...40)% от приведённого ко вторичной стороне ТТ тока КЗ. Указанные значения справедливы для оценки поведения быстродействующих избирательных и пусковых органов защиты.

Практические рекомендации

Установлено, что дифференциальные защиты шин, в том числе базирующиеся на использовании принципов торможения и сравнения направлений токов, могут неселективно срабатывать при внешних однофазных КЗ по причине насыщения ТТ, установленных в неповреждённых фазах. По ТТ неповреждённых фаз в данном режиме протекает ток, обусловленный перераспределением вторичного тока ТТ повреждённой фазы между нулевым проводником и ветвью вторичного тока ТТ в неповреждённой фазе.

С целью исключения неселективного срабатывания защит рекомендуется использовать цифровое суммирование токов одиночных ТТ, так как при этом отсутствует взаимное влияние ТТ при насыщении их магнитопроводов [8]. Указанное мероприятие эффективно не только для дифференциальных, но и для дистанционных защит, как показано в [9, 13].

С целью реализации данной рекомендации вторичные обмотки ТТ, соединённые в звезду, должны подключаться к токовым входам микропроцессорных терминалов отдельными нулевыми проводниками, как показано на рис. 6, в.

Если возможность такого подключения отсутствует, то можно обеспечить правильную работу защиты путём включения параллельно нулевому проводнику имеющихся свободных жил контрольных кабелей в каждой группе ТТ защиты. Можно также прокладывать дополнительные контрольные кабели для увеличения сечения нулевых проводников.

Ниже приведён пример расчёта сечения нулевого проводника для исключения неправильного срабатывания ДЗШ по причине насыщения ТТ в неповреждённой фазе при условиях неселективного срабатывания ДЗШ на ПП 110 кВ «Угутский» (описанного в данной статье).

Принято, что в магнитопроводе ТТ имеется остаточная магнитная индукция с коэффициентом K_r (в долях от индукции насыщения, равной 2 Тл) неблагоприятного знака:

- 1) $K_r = 0,86$ (по рекомендации ПНСТ 283-2018 [15]);
- 2) $K_r = 0,8$ (по результатам моделирования размагничивания ТТ в программном комплексе PSCAD);
- 3) $K_r = 0,75$ (по МЭК 60255-121:2014 [14]).

Пример расчёта

Исходные данные: номинальный первичный ток ТТ $I_{1.ном} = 600$ А; номинальный вторичный ток $I_{2.ном} = 5$ А; сопротивление фазного проводника с учётом нагрузки



$R_{\phi} = 1,51$ Ом, нулевого проводника $R_{н.п} = 1$ Ом; номинальная кратность тока $K_{ном} = 14$; номинальная мощность нагрузки ТТ $S_{ном} = 30$ ВА, соответственно, номинальное сопротивление нагрузки $1,2$ Ом. Действующее значение периодической составляющей тока КЗ в фазе А $I_{кз} = 5$ кА. Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ $T_p = 0,1$ с. В магнитопроводе ТТ имеется остаточная магнитная индукция неблагоприятного знака с $K_r = 0,86$ (в соответствии с [15]).

Расчёт

Фактическая кратность тока КЗ:

$$K_{факт} = \frac{I_{кз}}{I_{1.ном}} = \frac{5000}{600} = 8,33.$$

Ток намагничивания, соответствующий 10% полной погрешности ТТ:

$$I_{0,10} = 0,10 \cdot I_{2.ном} \cdot K_{факт} = 0,1 \cdot 5 \cdot 8,33 = 4,165 \text{ А.}$$

Напряжение насыщения ТТ $U_{2.нас}$ определяется по ВАХ, приведённой на рис. 4, по вычисленному значению тока намагничивания (4,165 А) и составило $U_{2.нас} = 166$ В.

Напряжение U_{2sin} при активном характере сопротивления нулевого проводника равно:

$$U_{2sin} = K_{факт} \cdot I_{2.ном} \cdot R_{н.п} = 8,33 \cdot 5 \cdot 1 = 41,65 \text{ В.}$$

Параметр режима работы ТТ А равен:

$$A = \frac{U_{2.нас}}{U_{2sin}} = \frac{166}{41,65} = 3,99.$$

Левая часть уравнения (1) равна:

$$A \cdot (1 - K_r) = 3,99 \cdot (1 - 0,75) \approx 1.$$

Время до насыщения ТТ в неповреждённой фазе В (при максимальном относительном содержании апериодической составляющей с постоянной времени затухания в пределах (0,03...0,1 с) и наличии остаточной магнитной индукции неблагоприятного знака) определено по рис. 3 [12] и приближённо равно 3,4 мс.

Исключение неправильного срабатывания ДЗШ по причине насыщения ТТ в неповреждённой фазе может быть гарантировано, если ТТ в повреждённой фазе насытится ранее, чем в неповреждённой. При этом следует учитывать, что в магнитопроводе ТТ, включённого в цепь повреждённой фазы, может быть остаточная магнитная индукция благоприятного знака, а в магнитопроводе ТТ, включённого в неповреждённую фазу – остаточная магнитная индукция неблагоприятного знака. Требуемое сечение нулевого проводника может быть определено с использованием приведённой ниже методики.

Для ТТ в повреждённой фазе с учётом сопротивления нулевого проводника можно записать:

Методика расчёта требуемого сечения нулевого проводника

Для ТТ в неповреждённой фазе аналогично:

$$U_{2.sin.повр} = K_{факт} \cdot I_{2.ном} \cdot (R_{\phi} + R_{н.п}), \tag{10}$$

где R_{ϕ} – суммарное сопротивление фазного проводника с учётом нагрузки.

Для ТТ в неповреждённой фазе аналогично:

$$U_{2.sin.неп} = K_{факт} \cdot I_{2.ном} \cdot R_{н.п}, \tag{11}$$

где $R_{н.п}$ – суммарное сопротивление нулевого проводника с учётом нагрузки.

Условие насыщения ТТ в повреждённой фазе раньше, чем в неповреждённой, имеет вид:

$$\frac{U_{2.нас}}{U_{2.sin.неп}} (1 - K_r) > \frac{U_{2.нас}}{U_{2.sin.повр}} \cdot (1 + K_r). \tag{12}$$

После преобразования выражения (12) с учётом (10) и (11) получено выражение для требуемого сопротивления нулевого проводника:

$$R_{н.п} < R_{\phi} \cdot \frac{1 - K_r}{2K_r}. \tag{13}$$

Если в магнитопроводах ТТ имеется предельно возможная остаточная индукция соответствующих знаков (в соответствии с [15]), то требуемое сопротивление нулевого проводника равно:

$$R_{н.п} = 1,51 \cdot \frac{1 - 0,86}{2 \cdot 0,86} \approx \frac{1}{8,14} \text{ Ом.}$$

Таким образом, с целью исключения неправильного срабатывания ДЗШ по причине насыщения ТТ в неповреждённой фазе в соответствии с [15] параллельно нулевому проводнику следует дополнительно подключить 8 жил контрольного кабеля, каждая из которых имеет сопротивление 1 Ом.

Следует отметить, что приведённый выше расчёт сопротивления нулевого проводника при $K_r = 0,86$ выполнен для случая совпадения трех условий:

- в магнитопроводе ТТ повреждённой фазы имеется предельная остаточная магнитная индукция благоприятного знака;
- в магнитопроводе ТТ неповреждённой фазы имеется предельная остаточная магнитная индукция неблагоприятного знака;



- в токе КЗ содержится максимальная апериодическая составляющая.

Полагая, что вероятность возникновения значительной апериодической составляющей в соответствии с [8] составляет 0,333, следовательно, вероятность возникновения такой составляющей определённого знака составляет 0,167, а вероятность наличия в магнитопроводе ТТ значительной магнитной индукции в соответствии с [7] равна 0,27, получаем вероятность существования данного режима равной: $p_{\text{реж}} = 0,167 \cdot 0,167 \cdot 0,27 = 0,0075$, т.е. 0,75%.

Очевидно, что указанный режим относится к редким событиям, и его следует учитывать только при выполнении быстродействующей защиты особо ответственных объектов, оснащённых устройствами АПВ. В других случаях может оказаться достаточным включение меньшего количества жил контрольных кабелей, определённого по результатам моделирования размагничивания ТТ при времени АПВ, равном 1 с.

Моделирование размагничивания ТТ (с помощью программного комплекса PSCAD) после отключения тока КЗ показало, что за время бестоковой паузы при АПВ, равной 1 с, магнитная индукция снижается до уровня не выше 1,6 Тл, т.е. $K_r = 0,8$. При этом, соответственно:

$$R_{\text{н.п}} = 1,51 \cdot \frac{1-0,8}{2 \cdot 0,8} \approx \frac{1}{5,93} \text{ Ом.}$$

В таком случае параллельно нулевому проводнику достаточно дополнительно подключить 5 жил контрольного кабеля, каждая из которых имеет сопротивление 1 Ом.

При значении коэффициента остаточной магнитной индукции (в соответствии с требованием стандарта МЭК 60255-121:2014 [14]) требуемое сопротивление нулевого проводника равно:

$$R_{\text{н.п}} < 1,51 \cdot \frac{1-0,75}{2 \cdot 0,75} = \frac{1}{3,97} \text{ Ом.}$$

Таким образом, в условиях данного примера в соответствии со стандартом МЭК [14], можно гарантировать исключение неправильного срабатывания ДЗШ по причине насыщения ТТ в неповреждённой фазе, если параллельно нулевому проводнику будут дополнительно подключены 3 жилы контрольного кабеля, каждая из которых имеет сопротивление 1 Ом.

Выводы

1. Установлено, что одной из причин неселективных срабатываний ДЗШ со схемой соединения ТТ в звезду с общим нулевым проводником в переходных режимах однофазных внешних КЗ является насыщение магнитопроводов ТТ в неповреждённых фазах.
2. Применительно к ДЗШ предложена методика рас-

чёта в переходном режиме однофазного внешнего КЗ времени до насыщения ТТ в неповреждённой фазе и допустимого сопротивления нулевого проводника в схеме ТТ, соединённых в звезду с общим нулевым проводником, основанная на использовании универсальных характеристик ТТ в переходном режиме.

3. В расчёте допустимого сопротивления нулевого проводника в схеме ТТ, соединённых в звезду с общим нулевым проводником, учитывая низкую вероятность совпадения максимальных значений апериодической составляющей и остаточной индукции (0,75%), целесообразно в соответствии с МЭК 60255-121:2014 принять значение коэффициента остаточной индукции в магнитопроводах ТТ равным 0,75 от индукции насыщения, т.е. 1,5 Тл.

4. В новых технических решениях с целью исключения неселективных срабатываний дифференциальных защит сборных шин при однофазных внешних КЗ по причине насыщения магнитопроводов ТТ в неповреждённых фазах целесообразно перейти от традиционной для ДЗШ схемы соединения ТТ в звезду с общим нулевым проводником к подключению ТТ фаз индивидуальными нулевыми проводниками.

Литература:

1. Стандарт МЭК 61869-2. Издание 1.0 2012-09. Международный стандарт. Измерительные трансформаторы. Часть 2: Дополнительные требования для трансформаторов тока. Редакция 1.0 2012 – 09.
2. IEEE/ANSI C.57.13 (1986): Standard Requirements for Instrument Transformers.
3. BS (British Standard) 3938 (1982): Current Transformers.
4. Справочник электрика промышленных предприятий / под общей редакцией А. А. Фёдорова и П. В. Кузнецова. М. – Л. Госэнергоиздат, 1954. – 1040 с.
5. Основы техники релейной защиты / Беркович М.А., Молчанов В.В., Семёнов В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376 с.
6. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
7. Циглер Г. Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения. – Перевод с англ. / Под ред. Дьякова А. Ф. – М.: Знак. 2008. – 216 с.
8. Об обеспечении необходимой точности работы защитных трансформаторов тока в переходных режимах / Кужекков С.Л., Дегтярёв А.А., Чердиченко К.В. // Электрические станции. – 2015. – № 5. – С. 53-60.
9. Дони Н.А. Возможность неселективного действия быстродействующих дистанционных защит при внешних повреждениях с большими токами КЗ. // Релейщик, 2015 – №4 – С. 30-33.
10. Новаш В.И., Сопьяник В.Х. Расчет переходных процессов в токовых цепях многоплечевых дифференциальных защит // Электричество, 1982 – № 7 – С. 74-76.
11. Багинский Л.В., Беляев Е.А. Особенности взаимодействия трансформаторов тока в цепях чувствительных быстродействующих защит // Электричество, 2003 – № 1. – С. 2-13.
12. Обеспечение правильного функционирования дифференциальных защит сборных шин в условиях насыщения трансформаторов тока / Кужекков С.Л., Дегтярёв А.А., Сербиновский Б.Б. // Известия вузов. Электромеханика, 2017. – том 60. – № 4. – С. 76-83.
13. Обеспечение правильного функционирования дистанционной защиты линии электропередачи в условиях насыщения трансформаторов тока / Кужекков С.Л., Дегтярёв А.А., Воробьёв В.С., Москаленко В.В. Электрические станции – 2017. – № 6. – С. 46-53.
14. Стандарт МЭК 60255-121:2014. Измерительные реле и оборудование релейной защиты – Часть 121: Функциональные требования к дистанционной защите.
15. ПНСТ 283-2018. «Трансформаторы измерительные. Часть 2. «Технические условия на трансформаторы тока».